

新型的热点簇中心定位算法及其应用

周少武, 黄博微, 曾照福, 周明辉, 詹杰

(湖南科技大学 信息与电气工程学院, 湖南 湘潭 411201)

摘要: 针对煤矿井下人员定位困难以及现有定位算法存在较大定位误差的问题, 提出了一种适合煤矿井下环境的新的热点簇中心定位算法。该算法利用 RSSI 值对移动节点在定位区域中的位置进行归类, 有效地解决了现有文献定位方法中存在的定位盲点问题, 同时, 提高了定位的实时性能和定位精度。数值仿真和实验结果证明了本方法的有效性。

关键词: 定位; ZigBee; 热点簇; 权重

中图分类号: TP393

文献标识码: B

文章编号: 1000-436X(2012)05-0124-07

New type of hot spot cluster centered positioning algorithm and its application

ZHOU Shao-wu, HUANG Bo-wei, ZENG Zhao-fu, ZHOU Ming-hui, ZHAN Jie

(College of Information and Electrical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: Considering the facts that the personnel orientation in the coal mine was difficult, and the existing algorithm is of high fixed position error, a new algorithm of hot spot cluster centered positioning for terrain underground in the coal mine was designed. The locations of moving nodes in position area were classified by using the RSSI, and the blind spots problems of positioning, which was not explained by the locating method mentioned in the existing literatures, was solved efficiently by means of new algorithm. Besides, the algorithm improved the real time performance and the accuracy of positioning. The validity of new algorithm was verified by the result of numerical simulation and experiment.

Key words: positioning; ZigBee; hot-spot-cluster; weight

1 引言

无线传感器网络定位算法有测距 (range-based) 定位法和非测距 (range-free) 定位法。测距定位法需要利用节点上的传感器测量移动节点与交换节点之间的距离或角度信息, 然后用三边测量法等^[1] 计算移动节点的位置。而非测距定位法则无需测量移动节点与交换节点之间的距离或角度, 仅需根据网络连通性、信号强度等信息实现节点的定位^[2]。

虽然一般来说测距定位法在定位的精确性上要高于非测距定位法, 不过这种精确性是建立在高成本的硬件设备的基础上的, 而且, 矿山井下环境复杂多变, 在各种复杂的地形或者空气中的不同成分、不同湿度的影响下测量的参数越多越容易因信号的衰减和多径效应^[3] 而引入误差。在这点上, 非测距定位法却有着极大的优势, 由于不需要测得精确的距离, 硬件设备的成本将大大降低, 便于大面积安装, 而定位的精度也可以由算法来提高。目前,

收稿日期: 2011-03-15; 修回日期: 2011-09-22

基金项目: 国家科技支撑计划课题基金资助项目 (2007BAK23B03); 国防基础科研计划基金资助项目 (B3720110008); 湖南省自然科学基金资助项目 (09JJ9012)

Foundation Items: The National Science and Technology Support Program of China (2007BAK23B03); Defense Industrial Technology Development Program (B3720110008); The Natural Science Foundation of Hunan Province (09JJ9012)

常用的非测距定位算法有凸规划^[4]、DV-Hop^[5]、MDS-MAP^[6,7]等。但是，凸规划算法要求定位网络中发出广播信号的参考节点位于网络边缘，否则节点位置估算会向网络中心偏移。这个要求对矿山井下复杂地形中的网络布设十分不利；而 DV-Hop 算法则仅在各项同性的密集网络中才能正确地进行定位^[8]。所谓各项同性，就是指信号强度不因为测定的方向不同而改变，而在矿山井下因为气体浓度，岩层成分等的影响，各项同性这个条件是难以保证的。而 MDS-MAP 要求整个网络有很好的连通性，而且在网络中必须有能进行高强度计算的节点。在矿山井下各个工作面之间的节点通信很难保证，而且要在每一个工作面配置高性能节点，成本将会非常高。由于井下的工作人员或器械的运动速度一般比较慢，故本文与移动节点的定位^[9]情况不同，为静态节点的定位。在无线技术的选择方面，比起用于长距离识别，且需要固定安装的有源 RFID 系统^[10]和用于高速运动中通信，耗能高且网络规模不大的 ad hoc^[11]技术，ZigBee^[12]技术具有组网方便，低功耗，网络规模大等优势，更适合煤矿井下人员定位，故选择基于 ZigBee 技术构建定位算法。JIN M H 等^[13]提出了一种基于 ZigBee 的最大簇中心定位算法 (MCCS, maximal-cluster centered scheme)，该算法利用节点信号强度信息，确定所有的定位辅助线位置，再由定位辅助线的分布确定定位区域中全部的簇，找出权重最大的簇，并以其质心位置作为移动节点的位置，但该算法存在定位计算量过大和定位盲点等问题。

本文针对已有定位算法存在的问题和矿山复杂的工况条件，提出了一种基于 ZigBee 的热点簇中心定位算法 (HSCCS, hot spot cluster centered scheme)，数值仿真的结果表明了该算法的有效性。

2 最大簇中心定位算法原理及存在的问题

2.1 MCCS 定位原理

MCCS 算法^[13]中包含 3 种节点：交换节点、参考节点和移动节点。其中，交换节点和参考节点的位置是固定且已知的。交换节点周期性广播含有自己 ID 数据分组，参考节点和移动节点接收并检测该广播信号的强度，再将包含此信号强度数据和自己的 ID 的数据分组发送给交换节点，这里假设无线信号覆盖区域为一个正圆。MCCS 定位系统的结构原理如图 1 所示，图 1(a)为 MCCS 算法以一个交换节

点为中心的结构原理图。●表示参考节点，○表示移动节点，⊙表示交换节点，⊙是等信号圆，表示能接收到与移动节点接收到交换节点信号强度相同的位置。按上述规则，当定位区域中存在 3 个交换节点时，情况如图 1(b)所示。根据无线信号的传播规律，所有交换节点所产生的定位辅助线（处于等信号圆两侧的 2 个参考节点，用一根短实线连接，这就是定位辅助线）越靠近移动节点就变得越密集。MCCS 算法认为，定位辅助线会在移动节点四周形成一个封闭的矩形簇。虽然在定位区域的其他部分也有可能形成封闭的矩形簇，但是移动节点附近的定位辅助线一定是最密集的。其判断方法为，2 个参考节点之间的定位辅助线每出现一次，它的权重加 1，簇的权重等于组成它的定位辅助线的权重之和。

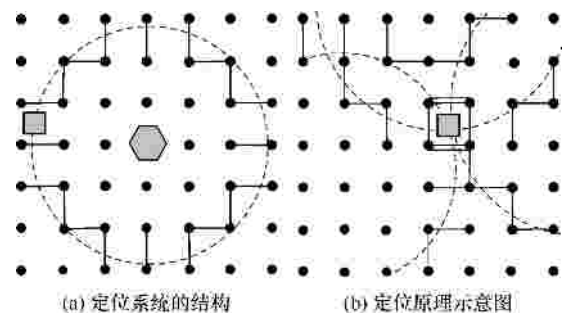


图 1 MCCS 定位系统的结构和原理

MCCS 算法的定位机理为：利用节点信号数据，确定所有的定位辅助线位置，再由定位辅助线的分布确定定位区域中全部的簇，找出权重最大的簇，并以其质心位置作为移动节点的位置。

2.2 MCCS 定位存在的问题

虽然 MCCS 算法逻辑清晰简洁，且对硬件的依赖小，但是该算法存在定位计算量过大和定位盲点等问题，需要进一步改进和完善。

1) 归类算法计算复杂度过大

MCCS 算法在进行定位时，会分别对每一个交换节点所产生的全部定位辅助线的权重进行计算。由于定位辅助线在定位区域中分布广泛，这就相当于对所有的参考节点进行反复的计算，而实际中其实关系到移动节点定位的定位辅助线只有其中很小的一部分。MCCS 算法消耗了很多不必要的计算量，非常耗时耗能，严重影响了定位的实时性和定位设备的寿命。

2) 定位盲点

当移动节点移动到定位区域中某些特定区域

时, MCCS 算法会无法正确找出移动节点所在的簇, 这样的现象称为归类错误。MCCS 算法用簇这个概念对定位区域进行了划分, 一类是移动节点可能存在的区域, 就是存在簇的区域; 另一类是移动节点不可能存在的区域, 这些区域没有簇存在。然后比较每个簇的权重, 找到权重最大的簇, 并计算出定位结果。但是, 有时也会出现例外的情况, 如图 2 所示。在参考节点的位置, 无线信号的强度, 外界的干扰等因素的共同作用下, 移动节点附近的定位辅助线可能无法全部正确生成。移动节点左边和右边的都没有封闭的矩形区域形成, 这样一来, MCCS 算法中簇的生成条件无法满足, 使得定位无法正确进行, 这样就出现了盲点。同样也是由于簇的归类, 当移动节点处于距离某一参考节点比较近的位置时, 虽然没有簇能很好地包含移动节点所处的区域, 但是 MCCS 算法依然会把移动节点的位置定位到某个簇的质心。这样的情况下, 定位虽然能够进行, 但会造成很大的定位误差。

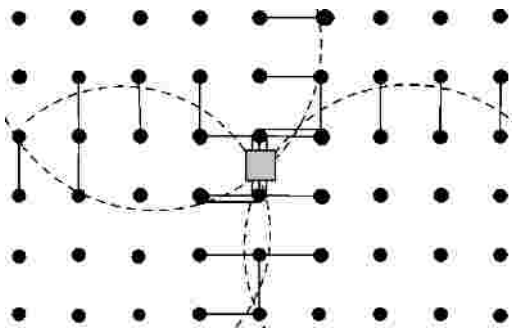


图 2 MCCS 定位归类错误

上述原因限制了 MCCS 算法的工程应用, 因此, 在此基础上研究一种改进的定位算法是十分必要的。

3 热点簇中心定位算法 (HSCCS)

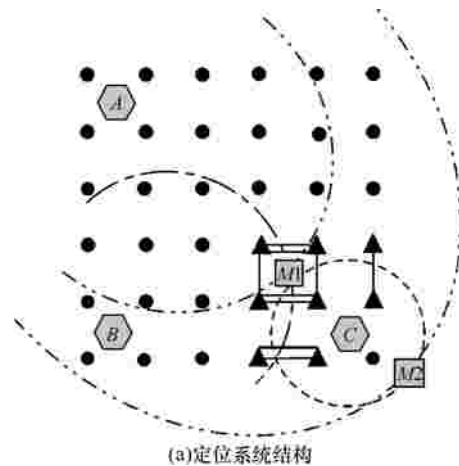
为克服 MCCS 算法存在的定位计算量过大和定位盲点等问题, 在 MCCS 算法的基础上, 提出了一种新型的热点簇中心定位算法 (HSCCS)。

3.1 HSCCS 算法定位原理

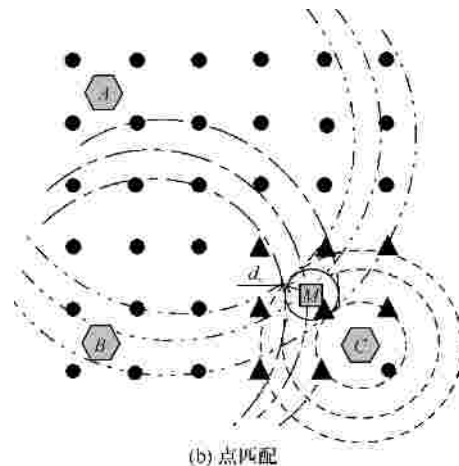
HSCCS 算法为了实现更精确、更高效、更节能的定位, 设计了 3 个主要的定位阶段。MCCS 算法中的归类错误是由簇的划分不正确引起的。在 HSCCS 算法中, 为修正这个错误, 规定定位区域中所有只包含 4 个参考节点的矩形区域都是簇。这样一来, 即使定位辅助线不能围成封闭的矩形, 这个

区域在定位时也不会被忽略, 在全部的簇中找出权重最大的簇的定位阶段, 称为簇匹配。MCCS 算法中的定位盲点是由于定位时只考虑区域性定位, 没有考虑定位区域中独立的点。在 HSCCS 算法中, 将每个参考节点本身的位置信息作为一个直接定位依据用于定位过程, 这样就可以用点定位过程来弥补区域性定位对特殊点定位的误差, 这个阶段称为点匹配。MCCS 算法中过大的计算量是因为定位时总是把整个定位区域中的所有数据全部带入定位计算。在 HSCCS 算法中, 当定位计算开始时, 会在定位区域中预先划定一个移动节点可能存在的区域, 这样划分就省去了对定位区域中移动节点根本不可能存在的区域的定位计算, 降低了计算复杂度, 这个阶段称为划分热点区。

图 3 为定位原理图, 在图 3 中, ? 是参考节点, A、B、C 是交换节点, 热点簇区域用 ? 表示, M1 和 M2 是待定位的移动节点, 虚线是参考节点相对于各个交换节点的等信号圆。HSCCS 算法主要阶段的原理如下。



(a) 定位系统结构



(b) 点匹配

图 3 HSCCS 定位算法定位原理

1) 划分热点区。在定位开始后，首先利用信号强度 (RSSI 值) 检测所有交换节点与移动节点的距离。如图 3(a)所示，距离移动节点最近的 C 为核心交换节点，距离移动节点最远的交换节点 A 为界标交换节点。因为距离移动节点最近的交换节点的等信号线在定位区域中经过的簇是最少的，所以令被核心交换节点 C 等信号线经过的簇区域称为热点簇。又因为，如果移动节点不在定位区域中，如 M_2 所在的位置，那么界标交换节点 A 的等信号线完全不会经过热点簇。这个依据用来判断移动节点是否处于定位区域外。

2) 点匹配。在簇匹配之前，先比较热点簇区域中每一个参考节点接收到交换节点的信号强度与移动节点接收到的交换节点的信号强度，如果能找到唯一的参考节点与移动节点完全匹配，或者，当移动节点接收到交换节点的信号强度与某个参考节点接收到的信号强度足够近似时，就认为移动节点在这个参考节点的位置，具体实现方法如图 3(b)所示。这里说的信号强度足够近似，其实就是移动节点与某个参考节点距离很近，设这个距离为 d_v 。那么在以移动节点 M 为圆心，以 d_v 为半径的这个“接近圆”中如果有参考节点，则点匹配成功。确定“接近圆”的方法如下：使各交换节点的等信号线圆向外扩展 d_v ，再向内收缩 d_v ，那么这几个交换节点等信号圆变化后的圆环所围的公共区域，可以近似等于“接近圆”，这个公共区域称为点匹配区域。由 IEEE 802.15.4^[14]给出的信号传播模型，可以从移动节点接收到某个交换节点的信号强度推算出，这个参考节点与交换节点之间的距离增加 d_v 和减少 d_v 后的信号强度值，就是点匹配的上下门限值。为了使点匹配区域尽可能小于等于“接近圆”，选择参考节点接收到界标节点的信号强度值来计算上下门限值。通过比较所有的参考节点接收到交换节点的信号强度值与移动节点接收到相应的交换节点的信号强度值之差是否在上下门限值范围内，就可以判断这个参考节点是否足够接近移动节点，从而完成点匹配任务。

3) 簇匹配。簇匹配的方法与最大簇中心定位算法基本相同，在热点簇中找到权重最大的簇，以这个簇的质心为移动节点位置。但是，当找到的最重簇为 2 个有公共边的等重簇时，根据中心极限法则，认为这 2 个等重簇组成的矩形的质心为移动节点位置。

3.2 HSCCS 算法设计

在定位过程中，当某一个移动节点需要定位

时，该移动节点将定位请求与自身可能接收到的各个交换节点的信号强度发给距离该节点最近的交换节点，定位过程如下。

设所需要定位的移动节点为 X ，令 $B=\{b_1, \dots, b_n\}$ 是 X 所能检测到的全部的交换节点， X 接收到对应这些交换节点的信号强度为 $\langle \mu_1, \dots, \mu_n \rangle$ ， $D=\{d_1, \dots, d_n\}$ 是定位区域中的所有的参考节点，对于任意 $d_x \in D$ 所接受到这些交换节点的信号强度为 $\langle \mu(b_1, d_x), \dots, \mu(b_n, d_x) \rangle$ ，已知一般距离——衰减模型^[15]如下：

$$Pa(l) = Pa(l_0) + 10n \lg \left(\frac{l}{l_0} \right) + x \quad (1)$$

其中， $Pa(l)$ 为经过距离 l 后交换节点信号的衰减量， $Pa(l_0)$ 为经过参考距离 l_0 后交换节点的信号强度， n 为路径衰减因子，表征衰减量随距离的增加而增长的速度， x 为遮蔽因子，是个零均值的高斯随机变量。与交换节点相距 l 的某一节点接收到交换节点的信号强度 $Pr(l)$ 则可表示为

$$Pr(l) = Pt - Pa(l) = Pt - Pa(l_0) - 10n \lg \left(\frac{l}{l_0} \right) - x \quad (2)$$

其中， Pt 为交换节点发射信号强度。在已知节点接收到交换节点的信号强度 $Pr(l)$ 时，距离 l 可由式 (3) 计算。

$$l = l_0 10^{\left(\frac{Pt - Pr(l) - Pa(l_0) - x}{10n} \right)} \quad (3)$$

在 IEEE 802.15.4 给出的信号传播模型中， Pt 、 $Pa(l_0)$ 、 l_0 、 x 都为已知，所以，信号强度和距离都可估算出来。

在 HSCCS 算法设计中，信号强度 μ 可用式 (2) 计算 (用函数 $\mu = \text{RSSI}(L)$ 表示)， L 为两点之间的距离，距离 L 可用式 (3) 计算 (用函数 $L = \text{Length}(\mu)$ 表示)， d_u, d_v 为 2 个相邻的参考节点， $d_u \in D, d_v \in D, HD = \{hd_1, \dots, hd_n\}$ ，为热点参考节点， $HD \subset D$ ， $S = \{s_1, \dots, s_n\}$ ，为所有连接 d_u, d_v 的定位辅助线，其权重表示为 $W_s = \{w_{s1}, \dots, w_{sn}\}$ ， $C = \{c_1, \dots, c_n\}$ 为定位区域中所有由 4 个参考节点构成的最小矩形区域，这里把它们都作为簇， $c_i = \langle D_i, S_i \rangle$ ， $D_i \subset D, S_i \subset S, HC = \{hc_1, \dots, hc_n\}$ ，为热点簇， $HC \subset C$ ，其权重表示为 $W_{HC} = \{w_{hc1}, \dots, w_{hcn}\}$ 。

1) 确定 2 个关键的交换节点。如果当 $i=1, \dots, n$ 时，有 $\mu_{\text{opt}} > \mu_i, \mu_{\text{opt}} < \mu_1, \dots, \mu_n$ ，那么对于移动节点来说， b_{opt} 为核心交换节点；当 $i=1, \dots, n$ 时，有 $\mu_{\text{wst}} < \mu_i, \mu_{\text{wst}} < \mu_1, \dots, \mu_n$ ，那么对于移动节点来说， b_{wst}

为界标交换节点，并计算出点匹配上下门限值 $U(\mu_{wst})$ 和 $D(\mu_{wst})$ ，设接近圆半径为参考节点行列间距 L_d 的一半 $L_d/2$ ，那么有：

$$U(\mu_{wst}) = RSSI(Length(\mu_{wst}) - L_d/2) \quad (4)$$

$$D(\mu_{wst}) = RSSI(Length(\mu_{wst}) + L_d/2) \quad (5)$$

2) 确定定位区域中的所有热点。当 b_{opt} 对定位区域中任意一组 d_u, d_v 有：

$$\begin{aligned} \max(\mu(b_{opt}, d_u), \mu(b_{opt}, d_v)) > \mu_{opt} > \\ \min(\mu(b_{opt}, d_u), \mu(b_{opt}, d_v)) \end{aligned} \quad (6)$$

如果连接这组 d_u, d_v 的定位辅助线为 s_x ，那么所有的 $c_x \supset s_x$ 都是热点簇，所有的 $hd_x \subset c_x$ 都是热点参考节点，对定位区域中所有的 d_u, d_v 用式(6)判断，就可得出定位区域中的 HD 和 HC 。

3) 验证 X 是否在定位区域中。若对任意一组 $d_u, d_v, d_u \in HD, d_v \in HD$ ，有：

$$\begin{aligned} \max(\mu(b_{wst}, d_u), \mu(b_{wst}, d_v)) > \mu_{wst} > \\ \min(\mu(b_{wst}, d_u), \mu(b_{wst}, d_v)) \end{aligned} \quad (7)$$

那么 X 在定位区域中，定位继续；若没有一组 $d_u, d_v, d_u \in HD, d_v \in HD$ 符合式(7)，那么 X 不在定位区域中，定位结束。

4) 进行点匹配。若有 $U(\mu_{wst}) + \mu_i < |\mu(b_i, d_x) - \mu_i| < D(\mu_{wst}) + \mu_i, hd_x \in HD$ ，那么 hd_x 的位置就是移动节点的位置，定位结束，反之，定位继续。这里 μ_i 是一个误差修正量，用来平衡井下环境因素干扰给定定位造成的影响，可根据不同的井下环境，干扰因素的大小进行不同的修正。

5) 进行热点簇权重的计算。对所有的 $d_u, d_v, d_u \in HD, d_v \in HD$ ，且 $i=1, \dots, n$ 时有：

$$\max(\mu(b_i, d_u), \mu(b_i, d_v)) > \mu_i > \min(\mu(b_i, d_u), \mu(b_i, d_v)) \quad (8)$$

式(8)成立了 k 次，那么连接这组 d_u, d_v 的定位辅助线 s_x 的权重 $w_{sx}=k$ ，利用式(8)计算出所有的 $S \subset HC$ 的权重，又由 $w_{hc} = \sum_{S \subset HC} w_s$ ，计算出所有的 W_{HC} 。

6) 进行簇匹配。若有唯一的 $w_{hcx} > w_{hci}, i=1, \dots, n$ ，那么这个最重簇 hcx 的质心就是移动节点的位置，定位结束；如有 $w_{hcx} = w_{hcy} > w_{hcb}, i=1, \dots, n$ ，且 w_{hcx} 与 w_{hcy} 为有公共边的相邻两簇，那么取这 2 个簇组成的矩形的质心为移动节点的位置，定位结束。

4 仿真实验

4.1 定位效果实验

假定定位区域为一块 50m × 50m 的正方形平面区域，参考节点均匀布散，间隔为 5m，交换节点处

在定位区域的 4 个顶点处，信号强度值 (RSSI) 由 IEEE 802.15.4 给出的简化信道模型式 (2) 进行计算。各种条件下定位效果仿真数据如表 1 所示。

表 1 各种条件下定位效果仿真数据

定位条件	移动节点坐标	定位结果坐标	定位误差	仿真效果图
点匹配	(41, -39)	(40, -40)	1.414 2m	图 4(a)
有等重簇	(26, -28)	(25, -27.5)	1.118m	图 4(b)
一般位置簇匹配	(13, -17)	(12.5, -17.5)	0.707 11m	图 4(c)
移动节点不在定位区域	(48, -24)	不在定位区域		图 4(d)

数值仿真结果表明 HSCCS 算法可以精确地定位处于特殊位置的移动节点 (如图 4(a) 和图 4(b) 所示)，有效地消除定位盲点；同时也能准确分辨处于定位区域之外的移动节点 (如图 4(d) 所示)。

4.2 定位精度和能耗分析

为了比较 MCCS 算法与 HSCCS 算法的定位精度和能耗，在第 4.1 节定位效果数值仿真实验环境下，将一定数量的参考节点均匀散布在这个区域中，在每一种散布状况下移动节点随机移动 500 次。对比使用 3 个交换节点时新旧 2 种算法的定位误差与定位所需的节点采样次数 (节点采样次数大小反映算法能耗的大小)。对比实验结果如图 5 所示。

数值仿真实验结果表明：1) MCCS 定位算法的定位误差大约是 HSCCS 定位算法的 2 倍左右 (如图 5(a) 所示)，在参考段数很少的情况下尤为明显；2) 在相同交换节点的情况下 HSCCS 定位算法的定位误差小于 MCCS 定位算法 (如图 5(b) 所示)；3) 在参考段数相同的情况下 HSCCS 定位算法的节点采样次数远小于 MCCS 定位算法 (如图 5(c) 所示)；4) 随着交换节点数量的增加，HSCCS 定位算法采样点数会同步上升 (如图 5(d) 所示)。从以上数值仿真中可以发现 HSCCS 算法无论从定位的精度还是定位的能耗上都要优于 MCCS 算法。

5 HSCCS 算法在井下环境中的工程实现

在煤矿井下环境的无线传感器网络定位中，最大的问题就是无线信号的传播会受环境的影响，衰减快、多径效应等都是这种影响的具体体现。而井下环境对无线信号最大的影响就是岩壁会完全阻断无线信号的传播，这种情况在信号发射功率很低的 ZigBee 网络中体现的尤为明显。

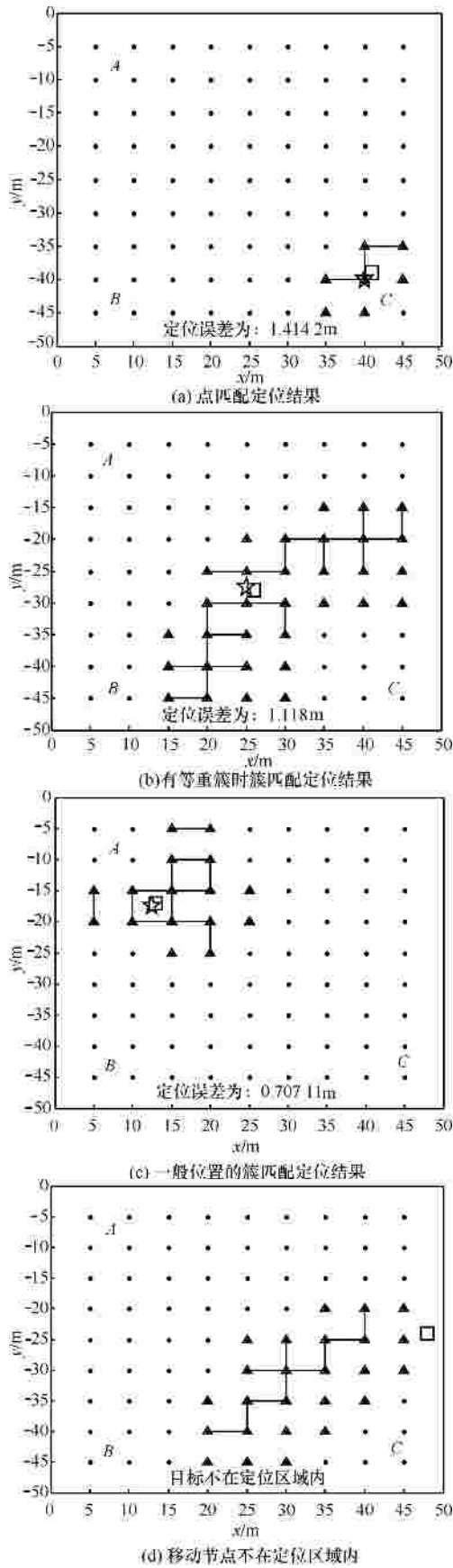


图 4 HSCCS 算法的定位仿真结果

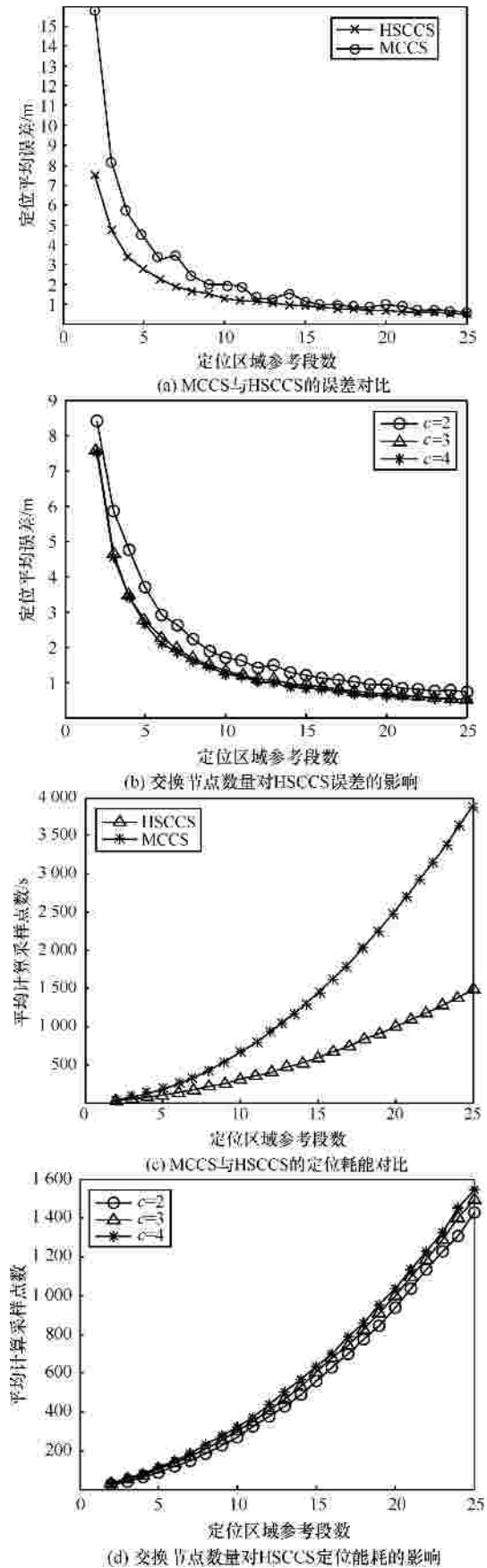


图 5 定位精度和能耗实验结果对比

对于信号的衰减和多径效应问题,目前常用的解决方案就是多次测量信号强度,并取平均值,事实证明这种方法非常简便而且在消除这类影响方面是非常有效的^[15,16]。但是,岩壁对信号的阻断是无法直接解决的。常规的无线局域网定位算法一般都是把定位区域作为一个整体进行定位,而这种方式在井下环境中是基本不可能实现的。所以,本文对 HSCCS 算法在井下环境中的工作模式设计如下。

如图 6 所示,图中阴影部分表示煤矿井下岩壁,空白区域为矿道;黑色圆点代表交换节点,六角形点表示 ZigBee 网络协调器。借助于 HSCCS 算法的热点区域划分和移动节点所在区域判别特性,可以把矿道区域分成 A、B、C 3 个区域分别进行局部定位。每个区域中的交换节点在所在区域中使用 HSCCS 算法对移动节点进行相对定位,再利用自己的绝对坐标把定位出的相对坐标转化为整个井下区域中的绝对坐标。这样,就可以在交换节点信号无法覆盖整个定位区域时进行定位了。

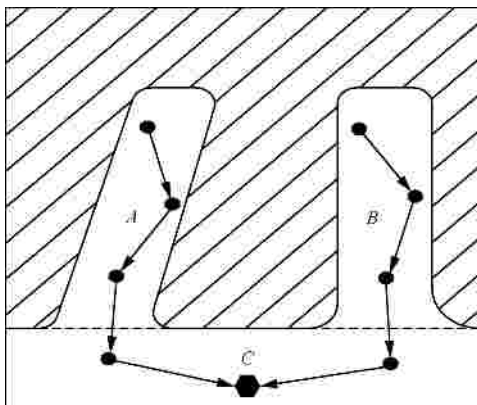


图 6 HSCCS 井下应用

在节点的部署问题上,如图 6 所示,每个定位区域中都必须有交换节点能与其他区域中的交换节点进行直线通信,如此一来,不同区域中的节点定位数据就可以由这些交换节点逐跳地传输给 ZigBee 网络协调器,并最终传输给上位机。而且,区域与区域交界处的交换节点必须尽量密集的布设,预留一定数量的冗余节点,以应对大量的数据通信及其带来的能量消耗。

6 结束语

本文设计了一种热点簇中心定位算法。这种算法对移动节点的定位只需要依据无线电信号的强度,所需要的设备简单,定位无盲点,且定位精度和定位时

间都可由用户自行调整。只要保证定位区域始终被 2 个以上交换节点的信号覆盖,定位就可以进行。本文所提出的定位算法已应用于煤矿井下人员定位系统中。

参考文献:

- [1] HIGHTOWER J, BORRIELLO G. Location Sensing Techniques. Technical Report UW CSE 2001-07-30[R]. Seattle: Department of Computer Science and Engineering, University of Washington, 2001.
- [2] 张治斌, 徐小玲, 阎连龙. 无线传感器网络人员定位算法[J]. 煤炭学报, 2009, 34(1):125-128.
ZHANG Z B, XU X L, YAN L L. Personnel localization algorithms for wireless sensor networks[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(1):125-128.
- [3] NERGUIZIAN C, DESPINS C L. Radio-channel characterization of an underground mine at 2.4 GHz[A]. IEEE Wireless Communications[C]. 2005. 2441-2453.
- [4] DOHERTY L, PISTER K S J, GHAOUI L E. Convex position estimation in wireless sensor networks[A]. Anchorage: IEEE Computer and Communications Societies[C]. 2001. 1655-1663.
- [5] NICULESCU D, NATH B. DV based positioning in ad hoc networks[J]. Journal of Telecommunication Systems, 2003, 22(1/4): 267-280.
- [6] SHANG Y, RUMML W, ZHANG Y, et al. Localization from mere connectivity[A]. Proc of the 4th ACM Int'l Symp on Mobile Ad Hoc Networking & Computing[C]. 2003. 201-212.
- [7] 马震, 刘云, 沈波. 分布式无线传感器网络定位算法 MDS-MAP(D)[J]. 通信学报, 2008, 29(6):57-62.
MA Z, LIU Y, SHEN B. Distributed locating algorithm for wireless sensor networks-MDS-MAP(D)[J]. Journal on Communications, 2008, 29(6):57-62.
- [8] 王福豹, 史龙, 任丰原. 无线传感器网络中的自身定位系统和算法[J]. 软件学报, 2005, 16(5): 857-868.
WANG F B, SHI L, REN F Y. Self-localization systems and algorithms for wireless sensor networks[J]. Journal of Software, 2005, 16(5): 857-868.
- [9] 曾凡仔, 孙正章, 罗娟等. 无线传感器网络的节点定位方法[J]. 通信学报, 2008, 29(11):62-66.
ZENG F Z, SUN Z Z, LUO J, et al. Improved node localization algorithm for wireless sensor network[J]. Journal on Communications, 2008, 29(11):62-66.
- [10] HIGHTOWER J, BORRIELLO G, WANT R. SpotON: an Indoor 3D Location Sensing Technology Based on RF Signal Strength[R]. Technical Report UW CSE 2000-02-02, Seattle: Department of Computer Science and Engineering, University of Washington, 2000.
- [11] NICOLESCU D, NATH B. Ad hoc positioning systems (APS)[A]. Proc of the 2001 IEEE Global Telecommunications[C]. SanAntonio, 2001. 2926-2931.
- [12] ZigBee Alliance. ZigBee Document 053474r13[S]. 2006.
- [13] JIN M H, WU E H K, LIAO Y B, et al. 802.11-based positioning system for context aware applications[A]. GLOBECOM 2003[C]. 2003. 929-933.

(下转第 137 页)

ers and Devices for Communication[C]. Kolkata, India, 2009.1-4.

- [11] HAMMOODI I S, STEWART B G, KOCIAN A. A comprehensive performance study of OPNET modeler for ZigBee wireless sensor networks[A]. 2009 Third International Conference on Next Generation Mobile Applications, Services and Technologies[C]. Cardiff, Wales, UK, 2009.357-362.
- [12] KARAPISTOLI E, PAVLIDOU F N, GRAGOPOULOS I, *et al.* An overview of the IEEE 802.15.4a standard[J]. IEEE Communications Magazine, 2010, 48(1): 47-53.
- [13] 王宝英, 蔡雪梅, 梅春燕等. 基于 ZigBee 技术的智能交通网络研究[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2007, 19(6): 748-751.
WANG B Y, CAI X M, MEI C Y, *et al.* Research of ITS based on ZigBee technology[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2007, 19(6):748-751.



李鹏翔(1986-), 男, 安徽宿州人, 重庆邮电大学硕士生, 主要研究方向为无线传感器网络组网技术。



姚玉坤(1964-), 女, 重庆人, 重庆邮电大学副教授, 主要研究方向为网络管理与应用及网络编码。

作者简介：



任智(1971-), 男, 四川内江人, 博士, 重庆邮电大学教授, 主要研究方向为无线移动通信网络。



黄勇(1985-), 男, 安徽黄山人, 重庆邮电大学硕士生, 主要研究方向为机会网络路由协议。

(上接第 130 页)

- [14] ZigBee Alliance. ZigBee Specification[S]. 2008.
- [15] 张洁颖. 基于 ZigBee 网络的定位跟踪研究与实现[D]. 上海: 同济大学, 2007.
ZHANG J Y. The Research and Implementation of Localization and Tracking in the ZigBee Network[D]. Shanghai: Tongji University, 2007.
- [16] GONÇALO G, HELENA S. Indoor location system using ZigBee technology[A]. Third International Conference on Sensor Technologies and Applications[C]. 2009. 152-157.

黄博微(1986-), 男, 江西九江人, 湖南科技大学硕士生, 主要研究方向为网络通信技术。

曾照福(1969-), 男, 江西上犹人, 湖南科技大学博士生, 主要研究方向为无线通信技术。

周明辉(1979-), 男, 湖南浏阳人, 湖南科技大学硕士生, 主要研究方向为无线通信技术。

作者简介：



周少武(1964-), 男, 湖南湘潭人, 博士, 湖南科技大学教授, 主要研究方向为无线网络通信技术、煤矿安全监控技术。

詹杰(1973-), 男, 湖南常德人, 湖南科技大学博士生, 主要研究方向为无线通信技术。